ÜBER ELEKTRISCHE SCHWINGUNGEN IN LUFT UND LÄNGS DRÄHTEN.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

VEREINIGTEN FRIEDRICHS-UNIVERSITÄT
HALLE-WITTENBERG

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

VORGELEGT VON

MAXIMILIAN EHRHARDT
AUS DUDERSTADT.

HALLE A. S.
VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH, LEIPZIG.
1915.

Referent: Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. E. Dorn.
Tag der mündlichen Prüfung: 12. Juni 1915.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig. 468

Dem Andenken
meines innig geliebten Vaters!

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546028_0122

Inhaltsverzeichnis: I. Einleitung p. 5. — II. Methode p. 7. — III. Apparate p. 7. — IV. Versuchsraum p. 11. — V. Vorversuche p. 13. — VI. Hauptversuche p. 18. — VII. Zusammenfassung p. 27.

I. Einleitung.

Da die Maxwellsche Theorie verlangt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen in Luft und längs Drähten die gleiche ist, so wurden in dieser Richtung bereits die verschiedensten Untersuchungen angestellt. Sie alle aber haben bisher noch nicht zu einer einwandfreien Darstellung der Luftwellen in Übereinstimmung mit Drahtwellen geführt. Die Abweichungen der beobachteten Interferenzkurven von den theoretischen beziehen sich einmal auf eine fehlerhafte Lage der Maxima und Minima in bezug auf ihre Entfernung vom Schirm und ferner auf unaufgeklärte Intensitätsschwankungen innerhalb der Kurven. Es sind hierfür von den einzelnen Beobachtern, von denen ich aus neuerer Zeit ganz besonders Hammer, Lindman, H. Herrmann und Sjöström zu erwähnen habe, verschiedene Erklärungen gegeben worden.

Hammer[1]) hat in seiner Arbeit das logarithmische Dekrement $\gamma = 0{,}7$ für die Dämpfung der elektrischen Wellen beim Durchlaufen des Luftraumes eingeführt. Die Intensität ist aber bei einer größeren Entfernung vom Oszillator umgekehrt proportional dem zurückgelegten Wege.[2]) Da nun Hammer fand, daß er so die Intensitätsschwankungen innerhalb seiner Kurven doch nicht genügend erklären konnte, verwies er auf den störenden Einfluß der Wände des Ver-

1) Diss. Halle 1909.
2) Vgl. diese Arbeit, Abschn. V, d.

suchsraumes, ohne genauere Beobachtungen darüber anzustellen.

Lindman[1]) untersuchte u. a., inwieweit die von Sarasin und de la Rive mittels eines kreisförmigen Resonators entdeckte Erscheinung der multiplen Resonanz bei Versuchen mit einem offenen, geradlinigen Resonator zur Geltung käme. Er fand, daß zur objektiven Bestimmung der elektrischen Schwingungen in Luft ein sehr stark, und vor allem stärker als der Erreger, gedämpfter Resonator erforderlich wäre.

H. Herrmann[2]), der die Versuche von Hammer wieder aufnahm, verfeinerte dessen Beobachtungsweise, indem er in den Resonator ein Thermoelement einschaltete, wodurch er in die Lage versetzt wurde, die beobachteten Intensitätsverhältnisse genau graphisch wiederzugeben. Außerdem benutzte er einen Mieschen[3]) Oszillator, der auf Stoßerregung beruhte und eine fast monochromatische Strahlung lieferte. Mit dieser Versuchsanordnung erhielt er dann auch eine regelmäßige Verteilung der Maxima und Minima in bezug auf ihre Entfernung vom Schirm; es ist aber merkwürdigerweise bei seinen Kurven das erste Maximum kleiner als das nächste. Diesen Umstand glaubt Herrmann auf die Stoßerregung im Oszillator zurückführen zu können. Wie nun aber im Verlaufe der folgenden Arbeit nachgewiesen werden wird, liegt der Grund in störenden Reflexionen am Fußboden bzw. an den Wänden des Versuchsraumes, auf deren Einfluß besonders Sjöström[4]) hingewiesen hat.

Sjöström glaubt, bei einer horizontalen Stellung der Antennen den Einfluß der seitlichen Wände gegenüber dem der Decke und des Fußbodens vernachlässigen zu können. Er rechnet also mit einer Spiegelung des Oszillators an Decke und Fußboden und den durch den Schirm entworfenen Spiegelbildern dieser Spiegelbilder. Mithin setzt sich die im Resonator resultierende Schwingung aus sechs verschiedenen Wellenzügen zusammen. Sjöström bemerkt selbst, daß eine genaue mathematische Formulierung der resultierenden Schwingung ihrer Unübersichtlichkeit halber wertlos sein würde.

---

1) Ann. d. Phys. **38.** p. 523. 1912.
2) Diss. Halle 1913.
3) G. Mie, Physik. Zeitschr. **11.** p. 1035. 1910.
4) Ann. d. Phys. **45.** p. 353. 1914.

Er beschränkt sich deshalb darauf, aus allgemeinen Überlegungen in dieser Weise die Unregelmäßigkeiten der von ihm beobachteten Kurven zu erklären.

Es veranlaßte mich nun Hr. Prof. Dr. Dorn, die Versuche über elektrische Schwingungen unter Berücksichtigung aller bekannten Fehlerquellen noch einmal aufzunehmen. Es handelte sich also darum, mit einem aperiodisch gedämpften Resonator in einem merklich störungsfreien Gebiete die Intensitätsverhältnisse der durch einen Mieschen[1]) Oszillator erzeugten monochromatischen Strahlung bei Reflexion an einem genügend großen Metallspiegel einwandfrei zu bestimmen.

II. Methode.

Die elektrischen Schwingungen längs Drähten wurden mittels eines Lechersystems hergestellt. Ein Thermoelement wurde als Brücke darauf verschoben und der Abstand zweier aufeinander folgender Maxima bestimmt, womit unmittelbar die halbe Wellenlänge der elektrischen Schwingungen gegeben war.

Die Wellenlänge der Luftwellen wurde durch Untersuchung stehender Wellen ermittelt. Diese wurden durch Reflexion der vom Oszillator ausgesandten elektrischen Schwingungen an einem Zinkschirm erzeugt. Ein stabförmiger Resonator, der ein Thermoelement enthielt, wurde vor dem Schirme auf einer Laufschiene verschoben und die jedesmaligen Galvanometerausschläge abgelesen. Aus der Lage der Maxima wurde dann die halbe Wellenlänge berechnet.

Zur Elimination der Intensitätsschwankungen im Oszillator war ein Indikatorkreis, der ebenfalls ein Thermoelement enthielt, in konstanter Lage zum Oszillator angebracht. Die Ausschläge des Resonators wurden durch diejenigen des Indikators dividiert, also auf den Indikatorausschlag 1 reduziert.

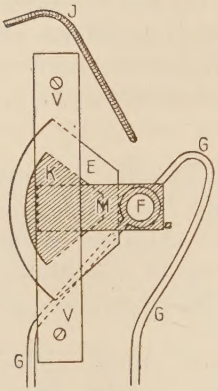
III. Apparate.

a) Oszillator.

Dieser war in Anschluß an Mie ungefähr nach den Maßen des von H. Herrmann[2]) benutzten hergestellt.[3]) Den Kondensator bildeten zwei Messingplatten KK von 1,5 mm Stärke,

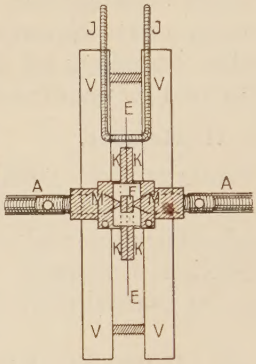
1) G. Mie, Physik. Zeitschr. **11.** p. 1035. 1910.
2) Diss. Halle 1913, p. 9.
3) Vgl. Figg. 1 und 2.

die durch eine Ebonitplatte E von 0,02 mm Dicke getrennt waren. Auf die Platten waren zwei starke Messingstreifen MM aufgelötet, die vorne mit seitlichen Verstärkungen versehen waren, um den durch sie hindurchgeschraubten Antennen AA und so der ganzen Funkenstrecke F einen möglichst festen Halt zu geben. Die Funkenstrecke war von einer Glaskammer



Seitenansicht des Oszillators.

Fig. 1.



Vorderansicht

Fig. 2.

A = Messingantennen
E = Ebonitplatte von 0,02 mm Dicke
F = Funkenstrecke (Silberelektroden)
G = Glasröhren zur Gaszu- u. -abfuhr
J = Messingbügel des Indikatorkreises
K = Kondensatorplatten aus Messing von 1,5 mm Stärke
M = Messingstreifen mit Verstärkungen
V = Vulkanfiberleisten

umgeben. Die Leuchtgaszu- und -abfuhr erfolgte durch zwei Glasröhren GG, und zwar so, daß die Funkenstrecke parallel zu den Elektrodenplatten durchströmt wurde, wodurch kleine abgeschiedene Kohlepartikelchen mit fortgerissen wurden. Die ganze Apparatur wurde durch zwei zusammengeschraubte Vulkanfiberleisten VV zusammengehalten. Die Elektroden hatten zuerst aus Kupfer, dann aus käuflichem Feinsilber bestanden. Da aber die Funkenstrecke während einer Ablesung schon sehr starke Unregelmäßigkeiten zeigte, wurden schließlich Elektroden aus chemisch reinem Silber verwandt, mit denen dann konstante Ausschläge erzielt wurden.

Dieser auf Stoßerregung beruhende Oszillator wurde durch ein mittelgroßes Induktorium mit Wagnerschem Hammer erregt. Die Sekundärspule war 15 cm lang, ihr Durchmesser betrug 10 cm; den Strom lieferte eine fünfzellige Akkumulatorenbatterie.

b) Indikator.

In einer Entfernung von 1,5 cm über der Funkenstrecke befand sich ein **U**-förmig gebogener Messingdraht J[1]), dessen 1 cm lange Grundseite der Funkenstrecke parallel verlief. Die beiden Enden dieses Messingdrahtes führten mittels einer längeren Leitung zu dem Hitzdraht eines Thermoelementes nach Vöge (Modell *E*). Dieses Thermoelement war mit Watte umgeben und in eine geerdete Blechbüchse eingeschlossen, so daß es gegen äußere Einflüsse, elektrische Schwingungen wie auch Temperaturschwankungen, geschützt war. Zwei kleine Öffnungen in der Blechbüchse gestatteten das Eintreten der Leitung zum Hitzdraht und das Austreten derjenigen zum Galvanometer.

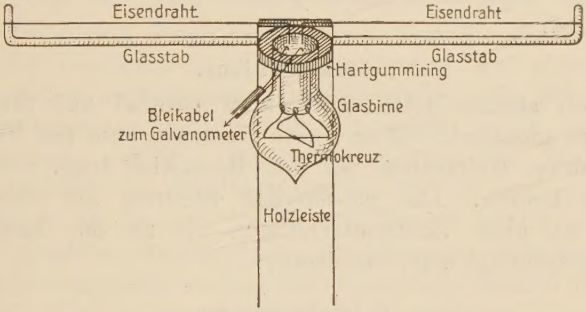


Fig. 3. Aperiodisch gedämpfter Resonator.

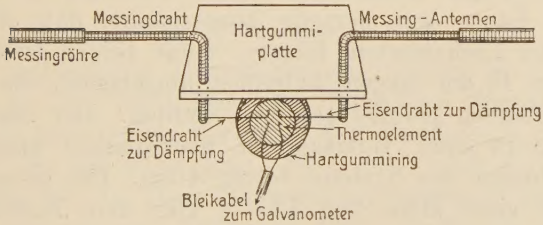


Fig. 4. Resonator.

c) Resonator.

Sein Hauptbestand war ein Vakuumthermoelement von Siemens & Halske mit den an den Hitzdraht angelöteten Antennen.[2]) Das Thermoelement bestand aus einer Kombination von Eisen–Konstantan, dessen Lötstelle durch einen

1) Vgl. Figg. 1 und 2.
2) Vgl. Figg. 3 und 4.

Hitzdraht aus Platin erwärmt wurde. Dieser Hitzdraht und das Thermoelement waren an der Lötstelle des Elementes zu einem Kreuz miteinander verlötet, und alles zusammen in einer evakuierten Glasbirne eingeschlossen. Der Widerstand des Hitzdrahtes betrug 44 Ohm, der des Thermoelementes 12 Ohm; bei einer Stromstärke von 10 Milliampere im Hitzdraht betrug die EMK. im Thermoelement 8,25 Millivolt. Die maximale Belastung des Hitzdrahtes war auf 15 Milliampere angegeben.

d) Zinkschirm.

Seine Länge betrug 3 m und seine Höhe 2,50 m. Er war 2 mm stark. Zwei Holzböcke hielten ihn in vertikaler Stellung. Sein Mittelpunkt befand sich 1,70 m über dem Fußboden.

e) Laufschiene.

Zwei starke Holzleisten waren parallel auf drei Holzfüßen so montiert, daß in ihrem Zwischenraum der Fuß eines senkrechten Holzstabes, der den Resonator trug, verschoben werden konnte. Die jedesmalige Stellung des Resonators wurde an einer Zentimeterteilung, die an der Laufschiene entlang befestigt war, abgelesen.

f) Lechersystem.

Ein einziger Kupferdraht von 1 mm Durchmesser und 18,40 m Länge war derartig ausgespannt, daß er ein geschlossenes Lechersystem bildete. Seine beiden freien Enden waren zu 10 cm langen Antennen umgebogen, die den Oszillatorantennen parallel gerichtet wurden. Der Abstand der parallelen in einer Vertikalebene übereinander angebrachten Drahtleitungen des Systems betrug 4 cm. Das ganze System wurde in einer Höhe von 1,65 m über dem Fußboden von Seidenfäden gehalten. Der Abstand zwischen den Antennen des Oszillators und denen des Lechersystems betrug 38 cm. Also war die Rückwirkung des Lechersystems auf den Oszillator sicher sehr gering.

g) Galvanometer.

Der Indikator war an ein Drehspulengalvanometer von Siemens & Halske angeschlossen. Der Widerstand zwischen den Klemmschrauben betrug 50 Ohm.

Für den Resonator wurde ein Drehspulengalvanometer von Hartmann & Braun mit zwei Wickelungen benutzt. Der Thermostrom wurde durch die ungefähr 5 Ohm habende Wickelung geschickt, während die zweite Wickelung von rund 100 Ohm durch eine Manganinspule von 1000 Ohm Widerstand zwecks Dämpfung geschlossen wurde.

Als Lichtquellen dienten eine Kohlefadenlampe und eine Nernstlampe, deren Spaltbilder auf eine durchscheinende Leinwandskala von 120 cm Länge fielen. Falls die Ausschläge des Resonators über die Skala hinausgingen, wurde für die Dauer des ganzen Versuches in den Thermostromkreis Widerstand eingeschaltet.

h) Leitungen.

Es hatte sich durch verschiedene Versuche als unbedingt notwendig ergeben, die Leitungen gegen die elektrischen Schwingungen zu schirmen. Deshalb wurden die Zuleitungen vom Induktorium zum Oszillator einzeln durch geerdetes Bergmannrohr geführt. Die Leitungen von den Enden des Messingdrahtes des Indikatorkreises bis zu der geerdeten Blechbüchse, in der sich das Thermoelement befand, verliefen in einer geerdeten Messingröhre. Als Leitungen von den beiden Thermoelementen bis zu den Galvanometern dienten geerdete Bleikabel. Ebenso war der Zinkschirm geerdet.

IV. Versuchsraum.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden in demselben Kellerraume des Nordflügels der Burgruine Moritzburg angestellt, in dem bereits Hammer und Herrmann gearbeitet hatten.[1]) Er ist 18 m lang, 13 m breit und 4,3 m hoch. Die Wände und die Decke bestehen aus unbehauenem rauhen Gestein, während der Fußboden durch Kalkmörtel geglättet ist. Die Decke ist in der Mitte ihrer Länge nach gewölbt. Der zur Erzeugung der stehenden Wellen verwandte Zinkschirm wurde deshalb schiefwinklig zur Längsachse des Versuchsraumes aufgestellt. Der Oszillator und Resonator befanden sich in der Richtung des im Mittelpunkte des Schirmes errichteten Lotes. Der Oszillator war auf einer weiten Ton-

1) Vgl. Fig. 5.

röhre mittels Holzstativs in der Mitte des Raumes aufgestellt. Der Nullpunkt der Laufschiene wurde ungefähr in die Schirmebene gerückt. Durch direktes Ausmessen des Abstandes zwischen Resonator und Schirm wurde die jedesmalige Korrektion für den Nullpunkt der Zentimeterteilung der Laufschiene bestimmt.

In einer der seitlichen Nischen, die die Wände des Versuchsraumes aufweisen, waren 5 m seitlich vom Oszillator entfernt die Galvanometer mit den Lichtquellen und die Skala

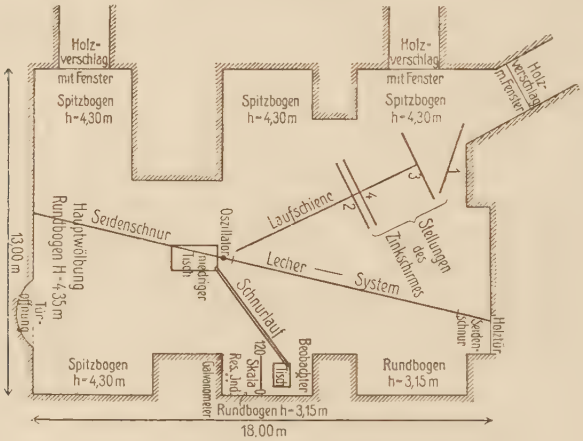


Fig. 5. Versuchsraum (Maßstab 1:300).

aufgestellt. Gleichzeitig befand sich dort eine einfache Anordnung, um mittels Schnurlaufes den Primärstrom ein- und auszuschalten. Der Abstand der Galvanometer voneinander betrug 20 cm, und der ihrer Verbindungslinie von der Skala 1,34 m. Der Fußpunkt des Lotes des Indikatorgalvanometers befand sich bei dem Skalenteil 45, also der des Resonatorgalvanometers bei 65. Bei einem Versuche wurde nun bei jeder einzelnen Stellung des Resonators zuerst der Nullpunkt von Indikator und Resonator abgelesen, dann der Primärstrom eingeschaltet, die beiden konstanten Ausschlagstellungen abgelesen, dann der Primärstrom wieder ausgeschaltet und der Resonator verschoben. Dadurch war eine Beeinflussung der elektrischen Schwingungen seitens des Beobachters ausgeschlossen; und da der Versuchsraum eine so günstige Gestaltung aufweist, war von vornherein kaum mit einer störenden

Reflexion an den Wänden oder der Decke zu rechnen. Lediglich der Fußboden konnte eine Störung verursachen, die durch besondere Versuche ermittelt werden mußte.[1])

V. Vorversuche.

a) Eichung der Galvanometer.

Die direkt an der Skala abgelesenen Galvanometerausschläge waren naturgemäß nicht den Stromstärken im Thermostromkreise proportional. Es wurde deshalb zunächst eine Tabelle für das Indikatorgalvanometer aufgestellt, in der die einzelnen Skalenteile derartig korrigiert wurden, daß sie demjenigen Kreisbogen entsprachen, der den Spiegel des Galvanometers zum Mittelpunkt und die Skala (im Fußpunkte des Lotes vom Galvanometer auf die Skala) beim Teilstrich 45 zur Tangente hatte. Der Teilstrich 0,0 wurde dadurch in 1,6 und der Teilstrich 120,0 in 113,4 korrigiert, während für die Skalenteile von 31,1—58,9 keine Korrektion eintrat, weil in diesem Bereich die Tangente mit dem Kreisbogen identifiziert werden konnte. Die entsprechenden Korrektionen wurden nun auch für das Resonatorgalvanometer berechnet. Bei diesem ergab sich für den Teilstrich 0,0 der korrigierte Wert 4,5 und für 120,0 der Wert 117,2, während sich die Identifizierung von Tangente und Kreisbogen auf den Bereich von 51,1—78,9 erstreckte.

Nachdem also die vier zu einer Beobachtung gehörigen Skalenwerte in dieser Weise korrigiert waren, wurden aus den beiderseitigen Differenzen die Galvanometerausschläge proportional den Drehwinkeln bestimmt. Mithin waren diese Werte unabhängig von der Lage des Nullpunktes zum Fußpunkte des Lotes. Der Nullpunkt des Resonatorgalvanometers lag ungefähr bei dem Skalenteil 10, der des Indikatorgalvanometers bei 110. Die beiden Ausschläge erfolgten nach der Mitte zu, wo ihre konstante Einstellung abgelesen wurde.

Nun mußte noch die Abhängigkeit des Drehwinkels von der Stromstärke ermittelt werden. Zu diesem Zwecke wurden die Galvanometerausschläge für Stromstärken von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $55 \cdot 10^{-7}$ Ampere bei dem Indikatorgalvanometer und

---

1) Vgl. diese Arbeit, Abschnitt V, d.

von $0{,}6 \cdot 10^{-6}$ bis $25 \cdot 10^{-6}$ Ampere bei dem Resonatorgalvanometer unter Berücksichtigung obiger Korrektionen in Skalenteilen bestimmt. Die hierbei angewandte Schaltung geht aus der Fig. 6 hervor.

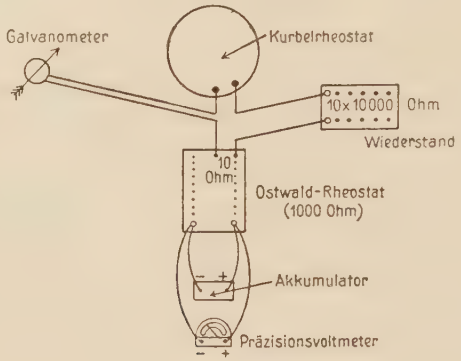


Fig. 6.

Von dem 1000 Ohm betragenden Widerstand des Ostwaldrheostaten wurde bei 10 Ohm Widerstand das Galvanometer mit einem $10 \cdot 10000$ Ohm Widerstand und einem Kurbelrheostaten in Nebenschluß geschaltet. Die Klemmenspannung am Ostwaldrheostaten wurde an einem Präzisionsvoltmeter von Siemens & Halske unmittelbar abgelesen. Die Stromstärke im Galvanometerkreise ist dann

$$i = \frac{V \cdot w_1}{W(w_1 + w_2) + w_1 \cdot w_2},$$

wobei

V = Klemmenspannung,
W = Widerstand des unverzweigten Stromkreises (990 Ohm),
w_1 = abgegriffener Widerstand (10 Ohm),
w_2 = Widerstand des Galvanometerkreises

bedeutet.

Daraus ergab sich, daß die Ausschläge des Indikatorgalvanometers bis zu einem Drehwinkel von 11,9 Skalenteilen den Stromstärken merklich proportional waren, während größere Ausschläge korrigiert werden mußten, so der Ausschlag von 85,0 Skalenteilen in 90,0. Die Ausschläge des Resonatorgalvanometers waren bis zu 29,9 Skalenteilen den

Stromstärken merklich proportional; von da ab begann eine Korrektion, so der Ausschlag von 100,0 Skalenteilen in 103,5.

Nachdem so die Resonator- und Indikatorausschläge proportional den Thermostromstärken bestimmt waren, wurde der Quotient: Resonator/Indikator gebildet, wodurch schließlich noch die Intensitätsschwankungen im Oszillator eliminiert wurden. Die so erhaltenen Werte bilden also ein Maß für die Stromstärke im Resonator-Thermostromkreise, wenn man die Stromstärke im Indikatorstromkreise gleich der Einheit setzt. Diese Werte wurden denn auch zur Zeichnung der Interferenzkurven verwendet. Dabei möchte ich nochmals darauf hinweisen, daß bei denjenigen Kurven, bei denen die Ausschläge des Resonators über die Skala hinweg reichten, noch besondere Widerstände in den Thermostromkreis eingeschaltet wurden, so daß man die verschiedenen Kurven nicht ohne weiteres bezüglich der Ordinaten miteinander vergleichen darf.

b) Bestimmung der Fehlergrenze.

Die Skala war in Zentimeter geteilt, von denen Zehntel geschätzt wurden. Man kann wohl annehmen, daß der Fehler hierbei sicher nicht mehr als $\pm 0{,}2$ beträgt. Das gibt bei der Differenzenbildung zwischen Ausschlag und Nullpunkt einen maximalen Fehler von $\pm 0{,}4$ für den Resonator und Indikator. Der absolute Fehler bei der Quotientenbildung Resonator/Indikator berechnet sich wie folgt:

$$F_{\text{abs.}} = \frac{R + r}{J - i} - \frac{R}{J};$$

dabei bedeute r den Ablesungsfehler für den Resonatorausschlag R, i den für den Indikatorausschlag J. In großer Annäherung erhalten wir

$$F_{\text{abs.}} = R/J\left(\frac{r}{R} + \frac{i}{J}\right)$$

$r = i = f$ gesetzt,

$$= R/J \cdot f\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{J}\right)$$

$$= f/J\left(1 + \frac{R}{J}\right).$$

Also für $|f| = 0{,}4$ und das äußerste Minimum der bei den Versuchen beobachteten Indikatorausschlägen $J = 40{,}0$ beträgt

$$F_{\text{abs.}} = \frac{0{,}4}{40{,}0}\left(1 + \frac{R}{J}\right),$$

$$F_{\text{abs.}} = 0{,}010 + \frac{\text{Res./Ind.}}{100}.$$

Danach erhalten wir für die allerungünstigste Kombination der maximalen Ablesungsfehler folgende Tabelle:

Res./Ind.	$F_{\text{abs.}}$
0,000	0,010
0,100	0,011
0,200	0,012
0,200	0,012
0,900	0,019
1,000	0,020
1,100	0,021
1,100	0,021
1,900	0,029
2,000	0,030

Dies bedeutet für den angewandten Maßstab von 0,300 gleich 1 cm Höhe einen maximalen Fehlerbereich von $^1/_3$—1 mm oberhalb und unterhalb der gezeichneten Kurven der Figg. 10, 12, 13, 14, 15 und 16.

c) Aufnahme der Resonanzkurve der Oszillatorantennen.

Die Antennen des Oszillators[1]) bestanden aus Messingröhren von 15 cm Länge und 4 mm innerem Durchmesser bei 0,5 mm Wandstärke, in denen Messingstäbe mit starker Reibung gegen die Innenwände verschoben werden konnten. Hierdurch war es möglich, die gesamte Antennenlänge von 30 cm an zu vergrößern. Die mehrfach aufgenommenen Resonanzkurven ergaben für den Resonanzpunkt eine gesamte Antennenlänge von 49,0 cm.

d) Untersuchung der Reflexion an den Wänden des Versuchsraumes.

Das im Abschnitt III, c dieser Arbeit beschriebene Thermoelement[2]) wurde mittels eines Hartgummiringes, der über den Hals der Birne geschoben war, an einer dünnen Holzleiste befestigt. An dieser wurde gleichzeitig ein an den Enden

1) Zum Teil in Fig. 2 bei *A* sichtbar.
2) Vgl. Fig. 3.

rechtwinklig umgebogener Glasstab angebracht. Nun wurde an den aus der Glasbirne des Thermoelementes herausragenden Enden des Hitzdrahtes Eisendraht (je 26,5 cm lang, bei einem Durchmesser von 0,015 mm) angelötet und die freien Enden an dem Glasstabe befestigt. Die gesamte Länge des Resonators betrug so 66,5 cm. Derselbe war aperiodisch gedämpft; denn bereits der Versuch, bei geringerer Dämpfung[1]) eine Resonanzkurve aufzunehmen, ergab eine mit wachsender Länge allmählich ansteigende Linie ohne Extrema. Nun wurde für den folgenden Versuch die Holzleiste derartig an dem auf der Laufschiene verschiebbaren vertikalen Holzstabe[2]) in horizontaler Stellung seitlich befestigt, daß die Resonatorantennen wieder eine vertikale Stellung parallel den vertikalen Oszillatorantennen einnahmen. Die Laufschiene selbst wurde so aufgestellt, daß die Verbindungslinie Oszillator—Resonator dieselbe war wie bei allen späteren Versuchen. Der Schirm[3]) befand sich 9 m weit vom Oszillator entfernt, und zwar in einem schiefen Winkel zu der zu untersuchenden Richtung, um Reflexionen an ihm oder der hinter ihm befindlichen Wand unschädlich zu machen. Unter diesen Bedingungen wurde nun der Intensitätsabfall der elektrischen Schwingungen in einer Entfernung von 0,75—7,50 m, vom Oszillator aus gerechnet, untersucht. Das Ergebnis zeigt eine Vergleichung der punktierten Kurve in Fig. 7 mit der ausgezogenen, welche unter Annahme einer mit der Entfernung umgekehrt proportionalen Intensität berechnet ist.

Aus der guten Übereinstimmung der beobachteten und berechneten Kurve geht ohne weiteres hervor, daß wenigstens in einer größeren Entfernung vom Oszillator (von etwa 2 m ab) die Intensität umgekehrt proportional dem zurückgelegten Wege der elektrischen Schwingungen ist. Damit ist die Annahme Hammers[4]) experimentell widerlegt.

Ferner konnte man aus dem Vergleich der beiden Kurven von vornherein den Schluß ziehen, daß von seiten der Wände des Versuchsraumes keine bedeutenden Störungen für die

1) Vgl. Fig. 4.
2) Vgl. diese Arbeit, Abschnitt III, e.
3) Vgl. Fig. 5, Stellung 1.
4) Vgl. diese Arbeit, Abschnitt I.

Interferenzkurven zu erwarten waren, falls man sich auf das Intervall von 4—5,50 m beschränkte oder jenseits von 7,25 m die Untersuchungen anstellte. Aber selbst die Störungsgebiete

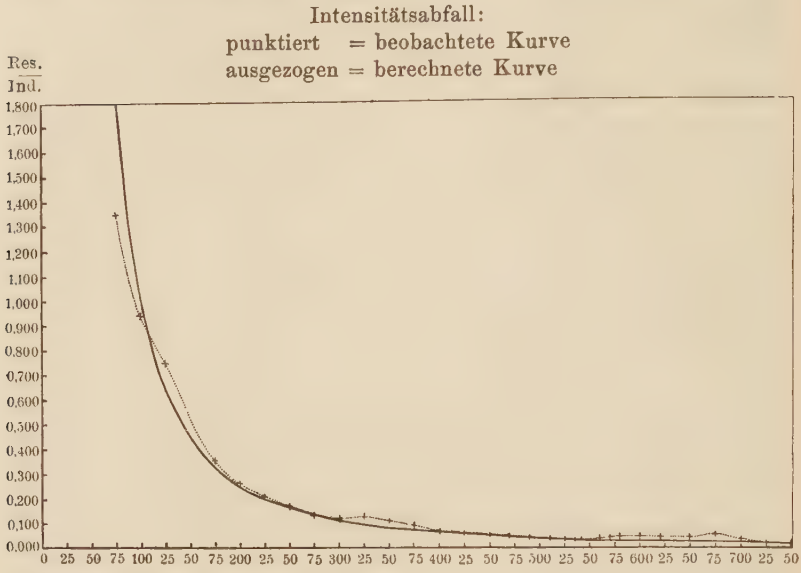


Fig. 7.

von 3—4 m und von 5,50—7,25 m zeigen einen ziemlich regelmäßigen Verlauf, weshalb die Untersuchungen der Interferenzkurven auch mit Erfolg auf diese Gebiete ausgedehnt werden konnten.

VI. Hauptversuche.

a) Elektrische Schwingungen längs Drähten.

Der Oszillator stand nahe der Mitte des Versuchsraumes; 38 cm vom Oszillator beginnend, wurde das im Abschnitt III, f dieser Arbeit beschriebene Lechersystem nach einer Ecke hin ausgespannt.[1]) Das ganze System mit den Antennen nahm hierbei eine vertikale Stellung ein. Die Mitte der Oszillatorantennen, also die Funkenstrecke, sowie die Mittellinie der

1) Vgl. Fig. 5.

Lecherdrähte befanden sich 1,65 m über dem Fußboden. Das Bleikabel, das vom Thermoelement zum Galvanometer führte, wurde durch Fäden in horizontaler Richtung senkrecht zu der Ebene des Systems gehalten. Von ganz besonderer Wichtigkeit war bei diesen Versuchen, daß der Kontakt zwischen der Leitung des Hitzdrahtes und dem Lecherdrahte ein möglichst vollkommener war. Die Kupferdrähte wurden deshalb

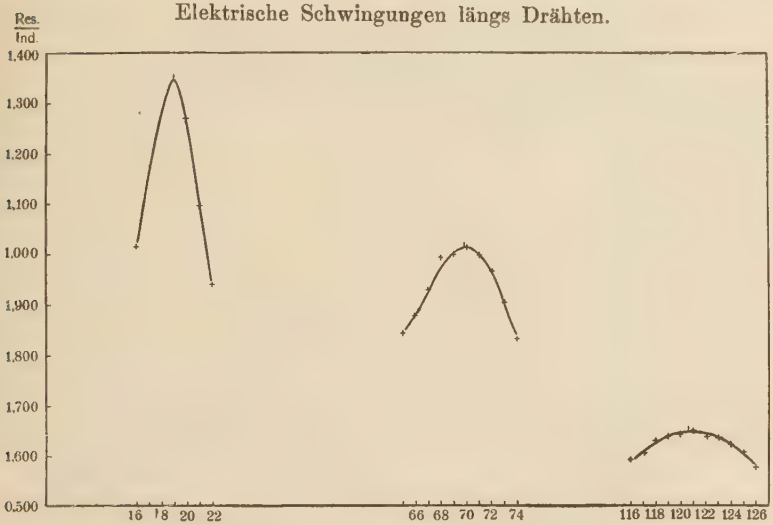


Fig. 8.

vor den Versuchen blank poliert. Es wurden zwei Versuche angestellt. Zuerst wurde der Leitungsdraht des Hitzdrahtes vom Thermoelement selbst fest um den Lecherdraht herumgewickelt und diese beiden so entstandenen Kupferspiralen auf dem Lechersysteme verschoben. Es wurden hierbei die drei ersten Maxima bestimmt. Fig. 8 gibt die so erhaltenen Werte an. Die drei Maxima liegen bei

19,0 69,8 120,6,

mithin ist

$$\lambda/2 = 50{,}8 \text{ cm}.$$

Bei dem zweiten Versuche wurden ganz kleine Klemmschrauben verwendet, die je zwei Bohrungen enthielten. In

der einen blieb das Ende des Hitzdrahtes konstant festgeschraubt, während durch die zweite Bohrung der Lecherdraht geführt war. Es wurden so die beiden ersten Maxima bestimmt, die bei

18,8 und 69,6

lagen (vgl. Fig. 9). Es war also wiederum

$$\lambda/2 = 50{,}8 \text{ cm}.$$

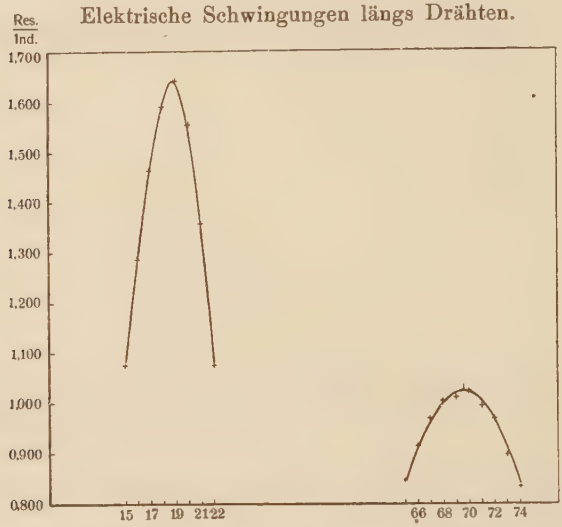


Fig. 9.

b) Elektrische Schwingungen in Luft.

1. Bei vertikaler Antennenstellung.

Der im Abschnitt III, d dieser Arbeit beschriebene Zinkschirm[1]) wurde in einem Abstande von 5,72 m vom Oszillator so aufgestellt, daß der Oszillator in der Richtung des Mittellotes stand und diese Richtung mit der im Abschnitt V, d dieser Arbeit untersuchten zusammenfiel. Die unter diesen Verhältnissen mit dem bereits im Abschnitt V, d beschriebenen Resonator[2]) beobachtete Interferenzkurve ist in Fig. 10 dargestellt.

1) Vgl. Fig. 5, Stellung 2.
2) Vgl. Fig. 3.

Zur Erklärung der in den Figuren angegebenen Werte sei bemerkt, daß

A = den Abstand zwischen Schirm und Oszillator bedeutet,
R = die Gesamtlänge des Resonators,
E_l = die Länge, und
E_d = den Durchmesser des gesamten zur Dämpfung des Resonators verwendeten Eisendrahtes

bezeichnen.

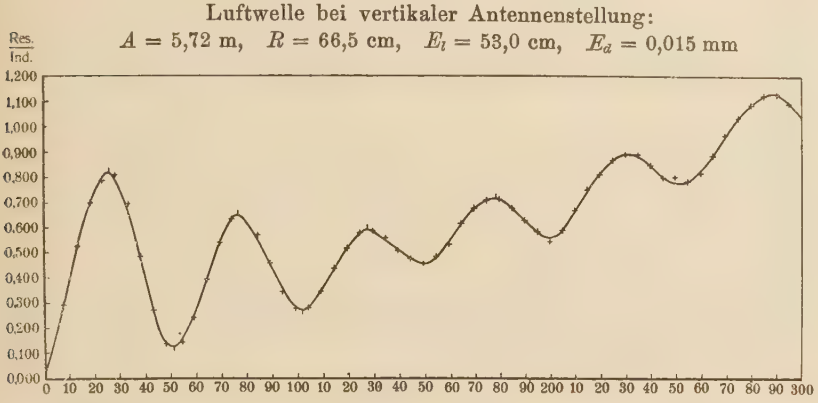


Fig. 10.

Die Fig. 10 zeigt, wie auch alle späteren, daß die Intensität in unmittelbarer Nähe des Schirmes gleich Null ist. Das erste Maximum ist das größte. Die Kurve steigt naturgemäß mit größerer Annäherung an den Oszillator allmählich an. In dem ersten Teil liegen die Maxima und Minima ganz korrekt, entsprechend der halben Wellenlänge von $\lambda/2 = 50{,}8$ cm, bei

Maxima:	25,4	76,2	127,0
Minima:	0,0	50,8	101,6

Ja, selbst das vierte Maximum stimmt noch mit seinem theoretischen Werte 177,8 überein; von da ab aber verflachen die Extrema, und wir kommen bereits in das im Abschnitt V, d dieser Arbeit gefundene Störungsgebiet[1]) hinein.

1) Vgl. Fig. 7.

Nun wurde noch ein zweiter Versuch gemacht. Hierbei befand sich der Schirm in einem Abstande von 8,50 m vom Oszillator.[1]) Der Resonator[2]) war derselbe wie bei dem ersten Versuche. Das Ergebnis zeigt Fig. 11. Es ist wiederum das erste Maximum das größte, und zwar liegen die Extrema bei

Maxima:		25,4	76,2
Minima:	0,0	50,8	101,6

entsprechend $\lambda/2 = 50{,}8$ cm.

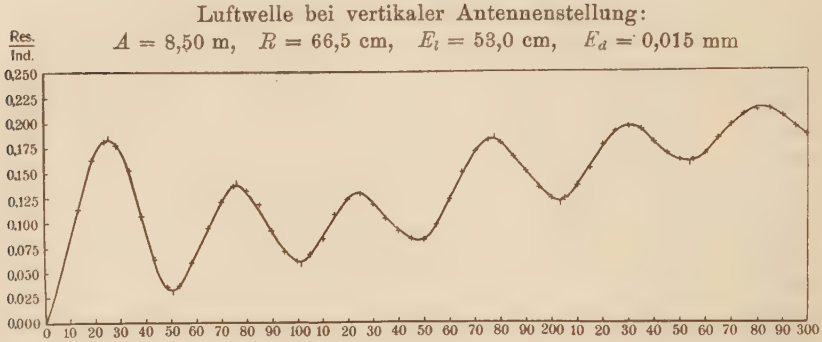


Fig. 11.

Die Entfernung 1,25 m vom Schirm entspricht bereits 7,25 m vom Oszillator; es beginnt also hier bereits das im Abschnitt V, d dieser Arbeit bestimmte zweite Störungsgebiet.[3]) Trotzdem ist der Verlauf der Kurve ziemlich regelmäßig; es stimmen sogar das vierte Maximum sowie das vierte und fünfte Minimum mit den Werten

177,8 203,2 254,0

mit den theoretischen Werten überein.

2. Bei horizontaler Antennenstellung.

A. Bei galvanisch gekoppelten Antennen.

Es wurden nun noch Versuche mit demselben Oszillator und derselben Entfernung von 8,50 m zwischen Oszillator

1) Vgl. Fig. 5, Stellung III.
2) Vgl. Fig. 3.
3) Vgl. Fig. 7.

und Schirm[1]), aber bei horizontaler Stellung der Antennen gemacht. Der Unterschied zwischen den so bestimmten vier Interferenzkurven lag in der Dämpfung des Resonators. Bei

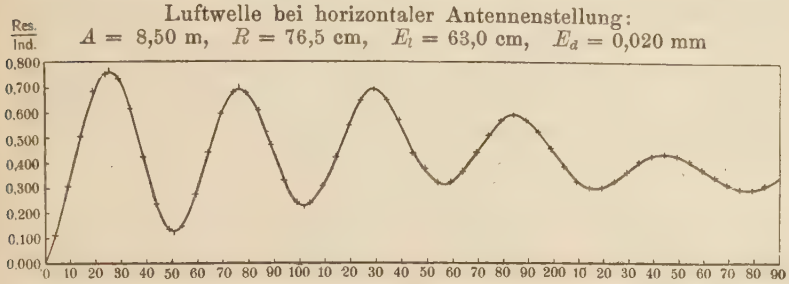


Fig. 12.

Aufnahme der Kurve, die Fig. 12 darstellt, hatte der Resonator die Gesamtlänge von 76,5 cm. Zu seiner Dämpfung wurden 63,0 cm Eisendraht von 0,020 mm Durchmesser ver-

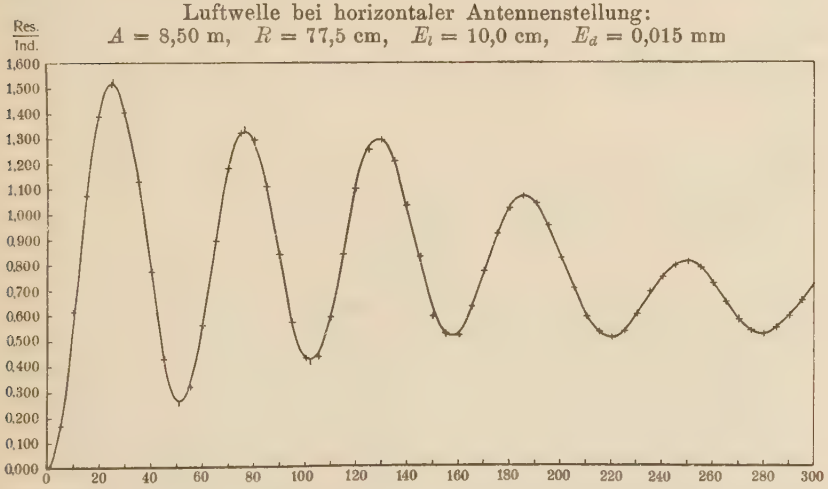


Fig. 13.

wendet. Das erste Maximum ist wieder das größte und die ersten Extrema liegen der Theorie entsprechend bei:

Maxima: 25,4 76,2
Minima: 0,0 50,8 101,6.

Von dann ab beginnt die Wellenlänge größer zu werden.

1) Vgl. Fig. 5, Stellung III.

Denselben Verlauf zeigen auch die anderen drei Kurven, obgleich der Resonator etwas geändert wurde. Während nämlich bis dahin[1]) der Eisendraht selbst die Antennen des Resonators gebildet hatte, wurden nun[2]) zwei Messingstäbe, über die zwei Messingröhren zum Verändern der Länge geschoben wurden, am Resonator angebracht. Der zur Dämpfung dienende Eisendraht wurde beiderseits zwischen dem Hitzdrahtende und dem Messingstabe eingelötet. Bei der Kurve (Fig. 13) hatte der Resonator eine Gesamtlänge von 77,5 cm,

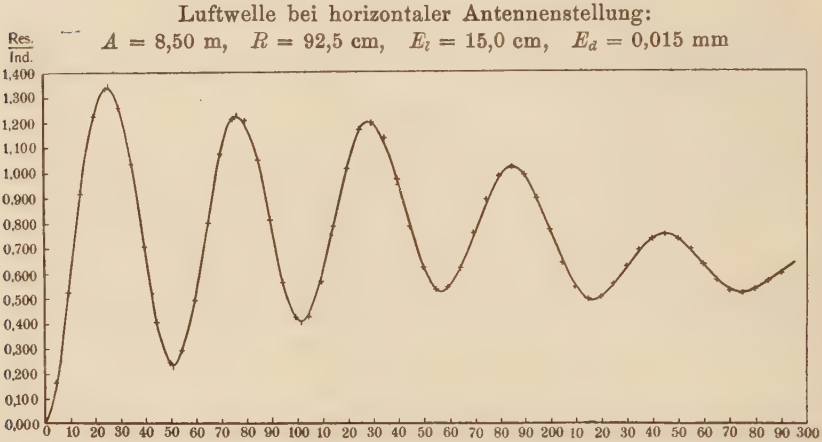


Fig. 14.

wobei 10,0 cm Eisendraht von 0,015 mm Durchmesser zur Dämpfung dienten. Die Kurve ist mit der vorherigen (Fig. 12) in bezug auf die Lage der Extremwerte identisch, auch in dem am Schluß ansteigenden Teile von $\lambda/2$. Der Grund liegt in der fast übereinstimmenden Gesamtlänge des Resonators. Die beiden anderen Kurven (Figg. 14 und 15) stimmen wohl in ihrem ersten Teile in der Lage ihrer Extrema mit den bereits beschriebenen überein, während der Schlußteil ihrer Kurven einen geringen Unterschied zeigt. Bei der Kurve in Fig. 14 ist der Resonator 92,5 cm lang, wobei 15 cm Eisendraht von 0,015 mm Durchmesser zur Dämpfung dienen, während

1) Vgl. Fig. 3.
2) Vgl. Fig. 4.

bei der Kurve in Fig. 15 die Resonatorlänge 86 cm beträgt, mit 8,5 cm Eisendraht von 0,019 mm Durchmesser. Dementsprechend ist auch das Anwachsen von $\lambda/2$ bei der erstgenannten Kurve größer als bei der letzteren, so daß man also bei diesen verhältnismäßig schwächeren Dämpfungen bereits einen geringen Einfluß der Resonatorlänge auf den Verlauf der Interferenzkurven feststellen muß.

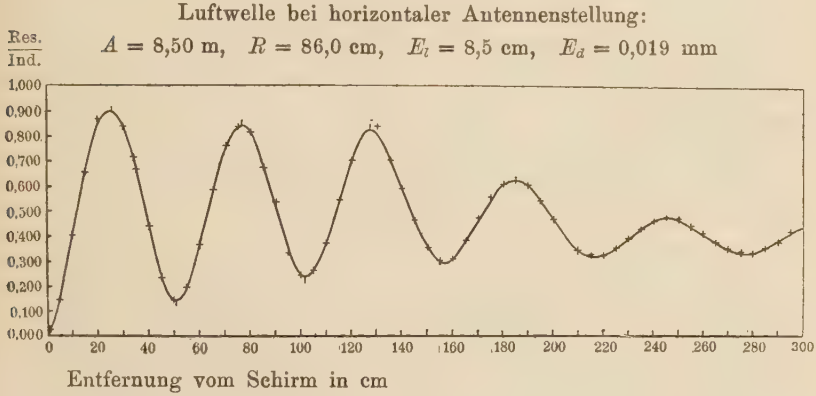


Fig. 15.

B. Bei induktiv gekoppelten Antennen.

Bei allen bisher beschriebenen Versuchen trugen die Oszillatorantennen selbst an ihrer Stirnfläche die Elektrodenplatten. Bei dem folgenden Versuche waren diese auf zwei kurze Messinggewindestücke aufgelötet, so daß der Kondensatorkreis als solcher überhaupt keine Antennen hatte. Dafür wurde ein Messingdraht von 3 mm Durchmesser, über den an beiden Seiten Messingröhren zur Verlängerung übergeschoben wurden, mit dem in seiner Mitte **U**-förmig ausgebogenen Stücke, unmittelbar über der Funkenstrecke induktiv mit dem Oszillator gekoppelt. Die Gesamtlänge dieser Antenne wurde wiederum nach mehrmaliger Aufnahme der Resonanzkurve für das Eintreten des maximalen Ausschlages bemessen. Nun wurde auch der Resonator, bei dem überhaupt kein Eisendraht zur Dämpfung eingeschaltet wurde, auf den Oszillator abgestimmt. Mit diesem abgestimmten Resonator wurde dann

die Interferenzkurve, die uns Fig. 16 zeigt, aufgenommen, wobei der Abstand zwischen Oszillator und Schirm 6 m betrug.[1]) Der Schirm befand sich also ungefähr an derselben Stelle wie bei der Kurve in Fig. 10.[2])

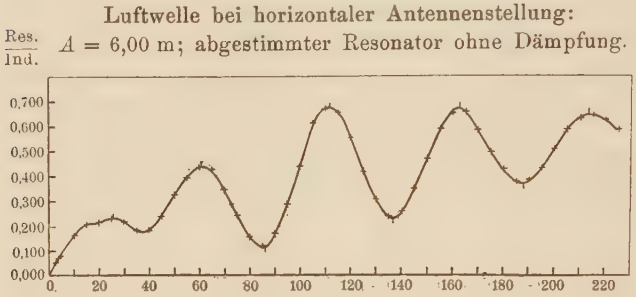


Fig. 16.

Wie bereits andere Versuche mit unabgestimmten Resonatoren ergeben hatten, war in dieser Entfernung vom Oszillator bei horizontaler Antennenstellung stets das erste und auch noch das zweite Maximum kleiner als die folgenden, weil hier für horizontale Antennenstellung ein Störungsgebiet lag. Das erste Maximum ist sogar zu einem Doppelmaximum ausgezogen; sein höchster Punkt liegt aber regelrecht bei 25,4.

Die Lage der Extrema ist folgende:

Maxima:	25,4	60,7	111,5	162,3	213,1
Minima:	0,0	— 86,1	136,9	187,7	

Die gegenseitige Lage des 2., 3., 4. und 5. Maximums wie des 2., 3. und 4. Minimums ergibt wieder $\lambda/2 = 50{,}8$ cm. Ihre Lage zum Schirm aber ist so, als ob dieser infolge des Störungsgebietes, in dem er sich befindet, eine Wirkung zur Folge hätte, die einer 15,5 cm weiter zurückliegenden Stellung entspräche. Diese Erscheinung, daß das erste Maximum nicht das größte ist, liegt also nicht, wie Herrmann annahm, in der Stoßerregung des Oszillators begründet, sondern lediglich in störenden Reflexionen an dem Fußboden des Versuchsraumes,

1) Vgl. Fig. 5, Stellung IV.
2) Vgl. diese Arbeit, Abschnitt VI, b, 1.

was besonders aus dem Vergleich mit der Kurve in Fig. 10 (bei vertikaler Antennenstellung) hervorgeht.

Versuche in einer noch größeren Nähe, von 3,15 m Entfernung zwischen Oszillator und Schirm, ergaben noch bedeutend stärkere Störungen.

VII. Zusammenfassung.

In der vorliegenden Arbeit sind die von den bisherigen Beobachtern angeführten Fehlerquellen bei der objektiven Bestimmung der Interferenzkurven elektrischer Schwingungen genau geprüft worden und nachgewiesen, daß in einem störungsfreien Gebiet die Ausbildung der Interferenzkurven vollkommen der Maxwellschen Theorie entspricht, indem die Intensität in unmittelbarer Nähe des Schirmes gleich Null ist. Das erste Maximum ist auch bei einer Stoßerregung[1]) im Oszillator das größte und liegt genau um $\lambda/4$ vor dem Schirme. Die folgenden Maxima sind entsprechend ihrer Entfernung vom Schirme kleiner. Die Intensität der elektrischen Schwingungen nimmt in Luft umgekehrt proportional dem zurückgelegten Wege ab. Die Wellenlänge der elektrischen Schwingungen in Luft und längs Drähten ist dieselbe. Zur Aufnahme der Interferenzkurven muß man entweder einen abgestimmten oder einen vollkommen aperiodisch gedämpften Resonator verwenden. Vorher muß man sich jedoch von der Abwesenheit irgendwelcher äußeren Störungen oder Reflexionen überzeugen.

1) Vgl. dagegen Herrmann, Diss. Halle 1913.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden von Oktober 1913 bis Ostern 1915 in dem Kellergewölbe der Burgruine Moritzburg in Halle a. S. ausgeführt, das dem physikalischen Institut der Universität zur Verfügung steht.

Es sei mir auch an dieser Stelle gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Geh. Reg.-Rat Professor Dr. E. Dorn, für die freundliche Anregung zu dieser Arbeit, sowie für das stete Interesse und die liebenswürdige Unterstützung bei ihrer Ausführung meinen ergebensten Dank auszusprechen.

Großen Dank schulde ich ferner Herrn Dr. H. Herrmann, der mir in freundlichster Weise mit Ratschlägen helfend zur Seite stand.

Lebenslauf.

Am 9. September 1891 bin ich, Maximilian Bruno Albert Walther Ehrhardt, als Sohn des in Merseburg verstorbenen Geheimen Regierungsrat Walther Ehrhardt und seiner Ehefrau Marie geb. Boelcke in Duderstadt, Provinz Hannover, geboren. Ich bin evangelischer Konfession und preußischer Staatsangehörigkeit. Meine gesamte Schulbildung genoß ich in Bromberg. Ich besuchte dort von Ostern 1898 bis Ostern 1901 die Vorschulklassen und alsdann die Gymnasialklassen des Kgl. Gymnasiums. Ostern 1910 erhielt ich das Zeugnis der Reife unter Befreiung von der mündlichen Prüfung.

Darauf widmete ich mich dem Studium der Mathematik und Naturwissenschaften, und zwar bis Ostern 1912 in Marburg a. L. und seitdem in Halle. Im Oktober 1914 übernahm ich die Vertretungsstelle für die drei im Felde stehenden Assistenten des hiesigen physikalischen Instituts der Universität. Die mündliche Doktorprüfung bestand ich am 12. Juni 1915.

Meine hochverehrten Lehrer waren die Herren Professoren und Dozenten:

in Marburg:

v. Dalwigk, Feußner, Fries, Hellinger, Hensel, Mannkopff, Neumann, Richarz, Schulze, Take, Thiel, Wegener, Zincke.

in Halle:

Boeke, Dorn, Eberhard, Fries, Gutzmer, Krüger, Menzer, K. Schmidt, Uphues, Vorländer, Wangerin, Wigand.

Ihnen allen spreche ich an dieser Stelle meinen ergebensten Dank aus.

Die vorliegende Arbeit erscheint gleichzeitig in den „Annalen der Physik“, IV. Folge, Band **47**, p. 809, 1915.